

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420318

研究課題名(和文) 超高記録密度積層構造ナノワイヤメモリの低電流・高速動作に関する研究

研究課題名(英文) Improvement of low drive current and high speed in stacked nanowire memories with ultra-high density recording

研究代表者

小峰 啓史 (KOMINE, TAKASHI)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：90361287

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電流誘起磁壁移動を用いた超高記録密度積層構造ナノワイヤメモリにおける低電流化と高速化を検討した。磁壁抵抗評価を通じて、低電流化のための候補材料であるTbFeCo薄膜のスピン分極率を評価した。その結果、0.16という磁壁移動に十分なスピン分極率を得た。磁成膜の下地層に流れる駆動電流が磁壁移動に及ぼす影響を調べたところ、駆動電流が作る面外磁場が磁壁移動を改善することがわかった。積層磁成膜における層間相互作用が磁壁移動に及ぼす影響を調べたところ、反強磁性結合によって磁壁移動速度が大幅に改善すること明らかになった。スピン軌道トルクとの組み合わせでさらなる高速動作が期待出来る。

研究成果の概要(英文)：In this study, improvement of low drive current and high speed in stacked nanowire memories by utilizing current-induced domain wall motion has been studied. The spin polarization of TbFeCo films was estimated through domain wall resistance, and its spin polarization of 0.16 was experimentally obtained. Influence of classical electromagnetic effect, especially drive current through seed layer, on domain wall motion has been investigated. As a result, the in-plane component due to current field from seed layer enhances domain wall speed. The influence of interlayer coupling on domain wall motion in bilayer nanowires has been also investigated. The anti-ferromagnetic coupling between magnetic layers remarkably improves domain wall speed. We concluded that combination of bilayer structure with spin-orbit-torque is expected to further enhance domain wall speed.

研究分野：機能性材料

キーワード：磁気メモリ 電流誘起磁壁移動 積層構造 層間相互作用 高速化

1. 研究開始当初の背景

スーパーハイビジョンなど映像情報を中心とするデータ量の爆発的な増大により、高速・高記録密度な情報記憶の需要は根強く、磁気を利用した高速・高密度なメモリデバイスへの期待は益々高まっている。

近年、スピントランスファートルク効果によるスピン制御デバイスが盛んに研究されており、不揮発、高速、高密度なメモリデバイス及び論理演算デバイスが提案されている。スピントランスファートルクによるスピン制御デバイスとして、電流誘起磁壁移動を利用した Magnetic Race-Track Memory が挙げられる(図 1)。Magnetic Race-Track Memory は、電流による磁壁駆動を用いた逐次アクセス型メモリであり、磁壁の電流駆動およびナノワイヤによる 3次元集積のアイデアは実用上興味深いばかりではなく、構造の工夫によって新しい論理素子の可能性も秘めている。

しかし、磁壁移動型メモリは、情報安定保持のための工夫が十分でないこと、磁壁を移動するのに必要な閾値電流密度が高いという問題がある。さらに、将来の大容量データ転送に対応するために動作速度の改善が望まれる。

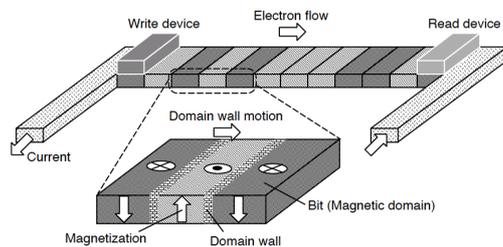


図 1 磁壁移動型メモリ (Magnetic Race-Track Memory)

2. 研究の目的

ナノワイヤメモリを実現するためには、低電流駆動・高記録密度を維持しつつ、高転送速度(高速磁壁移動)も実現する必要がある。本研究では、提案者が行った材料および構造検討を活かしつつ、磁壁を高速に動かすための材料及び構造を検討し、面記録密度 Tb/inch²、数十 Gbps オーダーの高速動作の可能性を模索することを目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、電流誘起磁壁移動を利用した磁性体積層構造ナノワイヤメモリにおいて、

低電流動作・超高記録密度・高速動作を同時に実現するため指導原理を確立するため、スピントランスファートルク効果(STT)の増強・磁壁移動度の改善を検討する。

STTの増強として、STTに直接影響を及ぼすフェリ磁性体のスピン分極率の組成依存性を理論・実験により調べる。また、磁壁移動度の改善として、積層構造の最適化及び各層の材料の最適化をシミュレーションにより模索する。これらの検討から、最終的に、10⁶ A/cm² オーダーの低電流密度、1 Tb/inch²の面記録密度、数十 Gbps オーダーの高速動作を同時に満たす条件を模索する。

4. 研究成果

(1) フェリ磁性体のスピン分極率

RF マグネトロンスパッタリング装置を用いて垂直磁化 TbFeCo 薄膜を作製した。フォトリソグラフィ及びリフトオフを用いて、TbFeCo 細線試料を作製し、TbFeCo の磁壁抵抗を調べた。磁壁抵抗の大きさはスピン分極率と関係することが Levy と Zhang によって理論的に示されており(PRL 1997)、本研究ではメモリ動作に必要な磁壁抵抗が現れるかどうかを確認し、磁壁抵抗測定を通じて磁壁移動に必要なスピン分極率が得られるかどうかを評価した。作製した素子の光学顕微鏡写真を図 2 に示す。

細線状素子は AlN 保護膜を有する

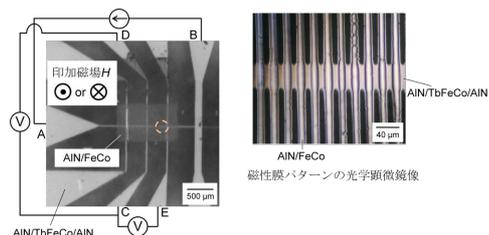


図 2 スピン分極率評価のための素子

AlN/TbFeCo/AlN の積層膜であり、ICP 発光分析などからフェリ磁性体の補償組成よりも遷移金属 rich な組成であることがわかっている。また、素子の一部に形成した AlN/FeCo のラインパターン(L/S)はその場所に磁束を集中させ、磁壁を導入するために付与したものである。保磁力程度の磁場を印加すると、磁化反転領域が L/S パターンに対応するため、結果として、図中 C-E 間には計 50 個の磁壁が導入される。素子の A-B 間に測定電流を流し、C-E 間の抵抗の磁場依存性を測定した。

素子の磁気抵抗を図3に示す．磁場強度の増加とともに抵抗が下がっており，これは一般的な異方性磁気抵抗効果であると考えられる．一方，保磁力近傍で抵抗が急峻に変化しており，この急峻に変化する部分は磁壁が導入されたことによる磁気抵抗であると考えられる．磁壁一つ当たりの磁気抵抗から，Levy-Zhang の理論に沿ってスピン分極率を見積もると，約0.16であることがわかる．また，磁壁部のみであれば，30%程度の磁気抵抗比を示しており，高密度ビットが可能になれば，磁壁抵抗による読み出しも可能であり，十分なS/N比も確保できる．以上の結果から，フェリ磁性体でも十分にスピン偏極した電流が流れていることを明らかにした．

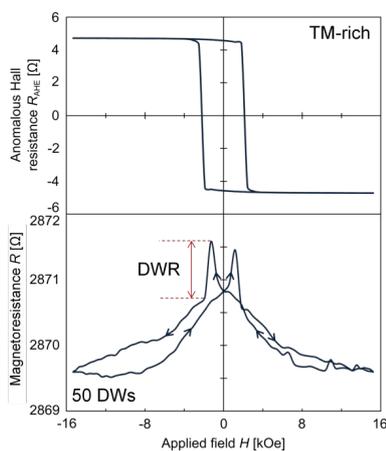


図3 TbFeCo 細線の磁壁抵抗

(2) 高速磁壁移動における電流磁場の影響

現在，開発を進めている磁壁移動型メモリは将来的には，スーパーハイビジョンに対応する24Gbpsを実現するためのものであり，磁壁の移動速度は数百m/sから数千m/sにも昇る．金属磁性体における磁化の高周波応答には，渦電流が大きな影響を及ぼすことが知られており，高速動作実現のための課題を整理する必要がある．本研究では，数値解析を行って，高速動作が磁壁速度に及ぼす影響を解析した．磁壁移動に及ぼす磁場をMaxwell方程式から導くと，駆動電流による磁場 H_a ，磁壁移動に伴う渦電流磁場 H_{eddy} の二つの代表的な効果がある．

$$H_a(r) = \frac{1}{4\pi} \int dr' \frac{j_a(r') \times (r - r')}{|r - r'|^3}$$

$$H_{eddy}(r) = \frac{1}{4\pi} \int dr' \frac{j_{eddy}(r') \times (r - r')}{|r - r'|^3}$$

ここで， j_a ， j_{eddy} はそれぞれ，駆動電流，渦電流であり，これらの磁場を数値的に解いた．これらの磁場は，磁壁移動に対するポテンシャルに相当し，磁壁に対するポテンシャルを

計算して，磁壁の運動方程式を数値的に解いた．

磁壁の回転速度とポテンシャル強度の関係を図4に示す．従来，磁壁の回転運動が磁壁移動に及ぼす影響は明らかにされていなかったが，高速な磁壁回転は，角度に依存する粘性力になることが初めて明らかとなった．次に，駆動電流が磁壁移動に及ぼす影響を見積もるために，磁壁に対するポテンシャルの磁壁角度依存性を解析した．その結果を図5に示す．比較のため，従来知られていた困難軸異方性エネルギー E_m も同図に合せて示した．現在，様々な研究機関で行われている実験は計算と同程度の駆動電流を用いており，古典電磁気が磁壁移動に及ぼす影響が無視できないことがわかる．これらの影響を加味して，計算した駆動電流と磁壁移動速度の関係を図6に示す．駆動電流 J は，磁性体の物性値を用いて次のように速度の次元を持つ量に変換できる．

$$u = JPg\mu_B / 2eM_s$$

ここで， P ， g ， μ_B ， e ， M_s はそれぞれスピン分極率， g 因子，ボーア磁子，電気素量，飽和磁化である．また，磁壁移動速度はダンピング定数，スピントルクの非断熱係数に関係することが知られており，実験的には

> と言われている．そのため，解析では様々な定数の組み合わせを調べた．その結果，> のときに古典電磁気による影響が磁壁移動速度を改善する傾向が得られた．速度の改善率は，低電流密度でも，約20%程度であり，電流密度が高くなるにつれてその影響は顕著になる．

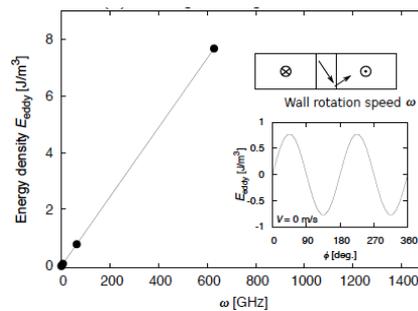


図4 渦電流ポテンシャルの磁壁角速度依存性

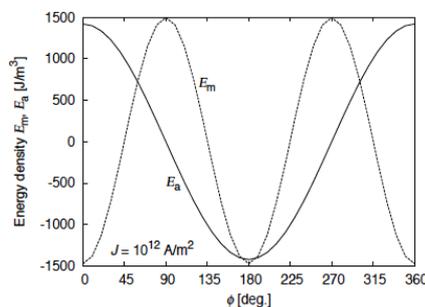


図5 磁壁ポテンシャルの磁壁角度依存性

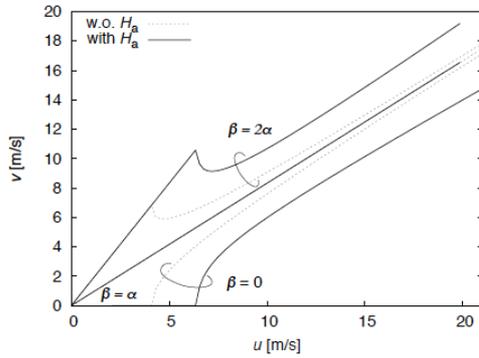


図6 駆動電流と磁壁移動速度の関係

現在、駆動電流によるセルフアシスト効果を積極的に取り入れたメモリ構造を提案しており、材料、積層構造、メモリ構造を調整することで、さらに大きな情報転送レートが得られるものと期待される。

(3) 反強磁性結合した積層型ナノワイヤにおける磁壁の運動方程式

反強磁性結合した積層型ナノワイヤの計算モデルを図7に示す。上下層の磁化は反平行に結合し、磁壁も両磁性層で結合しながら運動する。電流誘起磁壁移動によって両磁性層の磁壁は相互作用をしながら、ナノワイヤ中を伝搬する。このとき、磁壁内磁化の相互作用エネルギーは磁壁内磁化の角度によって次式で表すことができる。

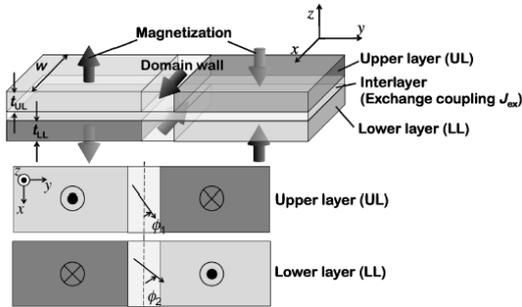


図7 反強磁性結合した積層型ナノワイヤの計算モデル

ここで、 $K_d^{(i)}$ は磁壁内磁化の回転のし易さを

$$\begin{aligned} \epsilon(\phi_1, \phi_2) = & K_d^{(1)} \cos 2\phi_1 + K_d^{(2)} \cos 2\phi_2 \\ & + K_s^{(1)} \sin \phi_1 + K_s^{(2)} \sin \phi_2 \\ & + (K_w + J_{ex}) \cos(\phi_2 - \phi_1), \end{aligned}$$

表す指標(Hard-axis anisotropy) $K_s^{(i)}$ は磁性層間の静磁結合の強さ、 $(K_w + J_{ex})$ は磁壁間の結合を表す。これらのエネルギーをマイクロマグネティックシミュレーションにより見積もった。

二つの磁壁の位置及び磁壁内磁化の角度をそれぞれ q_1, q_2 、 ϕ_1, ϕ_2 としたとき、磁壁の運動は次の連立微分方程式によって表現される。

マイクロマグネティックシミュレーションにより見積もったエネルギーの角度依存

$$(1 + \alpha^2)\dot{q}_1 = (1 + \alpha\beta)u - \frac{\gamma}{2M_s} \frac{\partial \epsilon}{\partial \phi_1}$$

$$(1 + \alpha^2)\dot{q}_2 = (1 + \alpha\beta)u + \frac{\gamma}{2M_s} \frac{\partial \epsilon}{\partial \phi_2}$$

$$(1 + \alpha^2)\dot{\phi}_1 = (\beta - \alpha) \frac{u}{\Delta} + \frac{\gamma\alpha}{2M_s} \frac{\partial \epsilon}{\partial \phi_1}$$

$$(1 + \alpha^2)\dot{\phi}_2 = -(\beta - \alpha) \frac{u}{\Delta} - \frac{\gamma\alpha}{2M_s} \frac{\partial \epsilon}{\partial \phi_2}$$

性を用いて、磁壁の運動を数値的に解析した。

積層構造における交換結合パラメータ H_{ex} を変えて磁壁移動速度を解析した結果を図8に示す。図8より、静磁相互作用がない場合、交換結合が強くなると、磁壁移動速度が減少する電流(速度) u が大きくなるのが分かる。つまり、大きな電流を流してもロスすることなく、磁壁が速く運動することを示唆している。最近、実験的に数百 m/s の磁壁電流駆動に成功しており、本研究で提案した二層膜で構成されている。実験では磁壁移動速度改善をスピン軌道トルクの寄与であると説明しているが、本研究で示した結果は、スピン軌道トルクの導入なしに、磁壁移動速度を改善できることを示している。今後、スピン軌道トルクの積極的な導入により、さらなるメモリ動作速度の向上が期待できる。

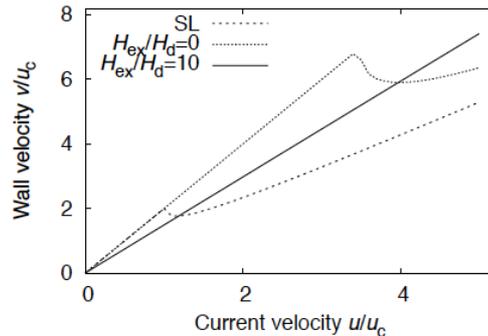


図8 交換結合の強さが磁壁移動速度に及ぼす影響

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)

- (1) T. Komine and T. Aono, "Micromagnetic analysis of current-induced domain wall motion in a bilayer nanowire with synthetic antiferromagnetic coupling", *AIP advances* (2016). [査読あり]
- (2) K. Saito, H. Sawahata, T. Komine, and T. Aono, "Tight-binding theory of surface spin states on bismuth thin

- films", *Phys. Rev. B* Vol. 93, 041301(R)/pp.1-6 (2016). [査読あり]
- (3) T. Komine, T. Aono, and R. Ando, "Influence of classical electromagnetic effect on current-induced domain wall motion in a perpendicularly magnetized nanowire", *J. Appl. Phys.* (2015). [査読あり]
- (4) J. Kajitani, T. Komine, and R. Sugita, "Micromagnetic study of influence of Gd content on current-induced domain wall motion in a ferrimagnetic nanowire", *IEICE Trans. Electron.* Vol. E96-C, No. 12, pp. 1515-1519 (2013). [査読あり]
- (5) M. Ito, A. Ooba, T. Komine, and R. Sugita, "Dependence of hard-axis anisotropy field on domain wall width for current-induced domain wall motion in nanowires", *J. Magn. Mater.* Vol. 340, pp. 61-64 (2013). [査読あり]
- (6) A. Ooba, T. Komine, and R. Sugita, "Micromagnetic study of novel domain wall motion modes in bilayer nanowire with low saturation magnetization", *J. Appl. Phys.* Vol. 113, 203915/pp.1-3 (2013). [査読あり]

〔学会発表〕(計 37 件)

- (1) T. Komine, and T. Aono, "Micromagnetic analysis of current-induced domain wall motion in a bilayer nanowire with synthetic antiferromagnetic coupling", 2016 Joint MMM-Intermag Conference, Jan. 11-15, 2016, San Diego(USA).
- (2) 小峰啓史, 青野友祐, 安藤亮, "積層構造ナノワイヤにおける電流誘起磁壁移動の数値解析", 2016 年第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 19-22 日, 東工大大岡山キャンパス(東京都・目黒区).
- (3) T. Komine, T. Aono, and R. Ando, "Influence of eddy current on current-induced domain wall motion in a magnetic nanowire", 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference, Nov. 3-7, 2014, Honolulu, Hawaii (USA).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：

番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
研究成果については,
<http://dirac.dmt.ibaraki.ac.jp>
にて, 逐次一般公開をしている。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小峰 啓史 (KOMINE TAKASHI)
茨城大学・工学部・准教授
研究者番号：90361287

(2) 研究分担者

杉田 龍二 (SUGITA RYUJI)
茨城大学・工学部・教授
研究者番号：20292477

青野 友祐 (AONO TOMOSUKE)
茨城大学・工学部・准教授
研究者番号：20322662

(3) 連携研究者

長谷川 靖洋 (HASEGAWA YASUHIRO)
埼玉大学・理工学研究科・准教授
研究者番号：60334158